

# 数据中心光纤洁净度—关于污染物的小秘密

康宁光通信 作者：Martin Hempstead、Eric ten Have

## 目录

引言	1
真正的即插即用——为什么洁净度对数据中心如此重要	2
连接器端面污染物的性质	3
污染物对光纤连接的影响	4
连接器端面污染物成像与测定	7
污染物的来源和机制	8
颗粒迁移	11
防尘帽设计的影响	12
结语	13

## 引言

当今的数据中心需要超高速、超低延迟的网络环境，以支持新技术和新应用程序在全球各地的部署。与此同时，数据中心还需要部署最优的技术解决方案，以便传输艾字节数据，支撑并丰富社交性互动及专业性互动。然而，所有这些努力都可能因光纤连接器末端的一粒灰尘、一滴油脂甚至一片皮屑而毁于一旦。

本文论述了数据中心洁净度的重要性，以及我们针对光纤连接器上的碎屑和其他污染物进行研究后获得的一些结果。

我们将探讨污染物对光学损耗产生的影响，并着重介绍基于目测检验结果得出的估算损耗。我们对污染物的性质进行了研究，确定了污染物的富集点，并分析了它们向端面移动的方式。我们也考虑到通过图像分析可靠地测量污染程度所面临的挑战，特别是在不使用仪器的情况下。我们还研究了防尘帽设计的影响及其对污染程度的影响，并在光纤仍可保持良好光学性能的情况下，在安装现场测试了取消连接器端面清洁工作的可能性。

## 真正的即插即用——为什么洁净度对数据中心如此重要

目前，康宁建议客户在安装康宁光纤连接器之前对其进行清洁，但不必逐一检查。作为清洁连接的一项关键评判标准，安装人员在打开连接器包装后应可以立即使用连接器连接设备，而不需要先逐个清洁连接器，更不需要按照惯例对连接器进行检查。

我们采用多种清洁方法，对大量MMF链路（例如那些将被安装在数据中心的链路）上的插入损耗进行了测试，以便检验上述做法的可行性（图1）。测试结果充分表明，从插入损耗分布和插入损耗故障次数来看，采用经过优化后清洁流程处理的产品以及因装配防尘帽而无需进一步清洁的产品（“在数据中心无需清洁”的情况）在性能上可媲美或者优于“现场”清洁的产品。

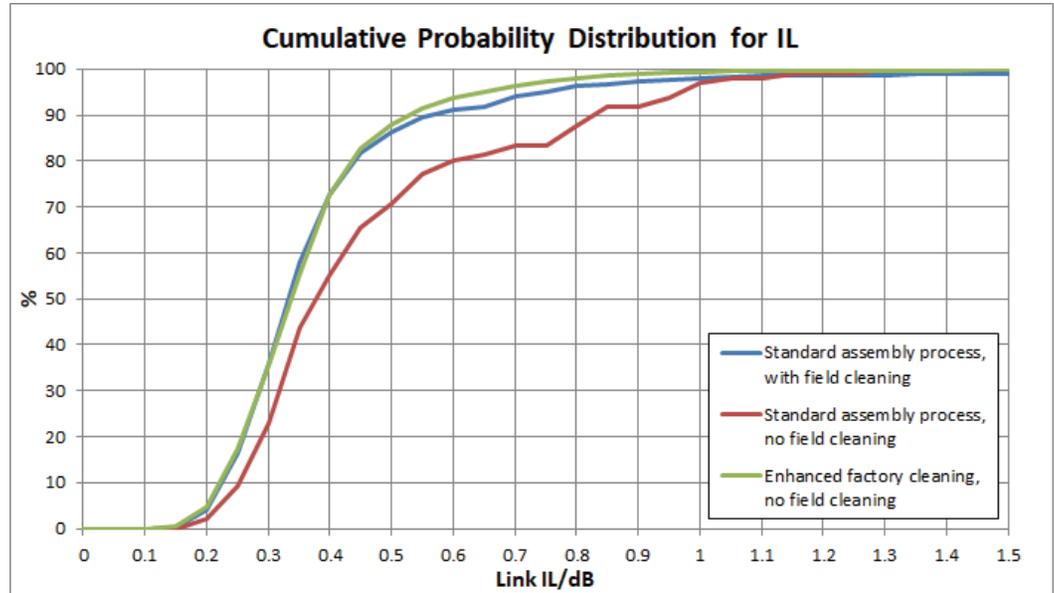


图1：对当前典型链路架构流程（需要现场清洁的标准装配流程，以蓝线表示）和“在数据中心无需清洁”流程（无需现场清洁的增强型工厂清洁流程，以绿线表示）的插入损耗值比较。链路由两个12芯LC转1个MPO模块组成，并通过一个MPO-MPO光纤跳线连接。数据表明，增强型工厂清洁流程和因装配优化后防尘帽的使用而无需现场清洁的流程的效果可媲美或优于目前的标准流程。此外，作为参考，我们还提供了关于无需现场清洁的标准装配流程（以红线表示）的数据，采用该流程生产出来的产品在性能上要逊于其他产品。

## 连接器端面污染物的性质

我们使用多种技术，对在行业内连接器端面上发现的物质类型进行了研究，其中包括：

- 通过扫描电子显微镜（SEM）获取形态学信息，并通过相关的能量色散X射线分析（EDX）获取关于元素构成的数据
- 通过拉曼光谱和红外光谱获取关于分子构成的信息

我们研究了数据中心中常用的单芯光纤连接器和多芯光纤连接器，研究结果参见表1和表2。连接器端面上的物质类型极为繁杂，其中许多都无法确定，包括：

- 皮屑，初步确认为含氮的有机颗粒，但是从组成成分上，很难将其与聚酰胺聚合物颗粒进行区分；
- 矿物质和其他无机碎屑；
- 油脂；以及
- 许多常见“有机”（含碳）颗粒，其中一些可能来自用于制作连接器外壳组件的注塑成型聚合物。

在带有氧化锆插芯的单芯连接器以及带有玻璃聚合物插芯的MPO连接器上都发现了这些物质。这些物质在颗粒大小和形态上存在着很大的差别。

聚酰胺（皮屑）	聚酯	丙烯酸胶粘剂
二氧化硅增强环氧树脂	碳/铝/盐	纤维素
有机物质	抛光残留物	碳酸钙
方解石粉（可能存在）	碳与铁/氯化钾粒子	滑石粉
碳/氧粒子（可能存在的聚合物）	有机物质/盐类成分	
碳污渍/污点	碳/氧/钠/硅/硫/氯/钾等光纤成分	

表1：在LC连接器端面上发现各类物质成分

聚酰胺（皮屑）	氯化钠粒子	碳/氧/硅与二氧化硅粒子
碳/氧粒子（可能存在的聚合物）	碳污渍/污点	硅/氧粒子
碳/氧/氮粒子	碳/氧/硅/氯粒子	纤维素
有机物质	聚醚酰亚胺（聚醚酰亚胺）	聚甲醛树脂（乙酰树脂）
LC-黑色塑料成分	碳化硅粒子	碳/氮/钠/硅/氯粒子
钾/铝/硅/氧粒子	碳/硅/氧粒子	有机盐
碳/氧/硅粒子	碳/氮/钠粒子	碳/钠/镁/铝/硅/钾/钙/铁与氯化钾夹杂物
不锈钢成分	显微镜夹具碎屑	二氧化硅成分
碳/钠/镁/铝/硅/氯/钾/钙与氧化锆夹杂物	氧/镁/硅粒子	碳/氧/钠/铝/硅/氯/钾/钙粒子
碳/氧/钠/镁/铝/硅/硫/氯/钾/钙粒子	有机物质与铝、硅和盐类成分	
碳/氧/硅/氮粒子	碳/氮/钠/氯粒子	

表2：在MPO连接器端面上发现各类物质成分

## 污染物对光纤连接的影响

我们使用多种技术，对在行业内连接器端面上发现的物质类型进行了研究，其中包括：

污染物对数据中心应用中光纤连接的潜在影响至少体现在两个方面：光的散射或吸收会造成光功率损耗（插入损耗），由此降低与单模光纤信号源相互作用的接收信噪比和反射功率（回波损耗）。这些问题的源头可能是污染物的直接光学效应、刚性污染物造成的气隙以及污染物造成的端面损坏等。

由于与被污染的端面对接存在较大风险，因此人们希望能够深入了解污染物对光学性能的影响。针对这一情况，在抛光后光纤端面上特定污染物分布给定的前提下，人们对预期的插入损耗进行了估算。

一种已发布的模型使用了功率加权遮挡面积法[1]。这种方法使用分布有污染物的连接器端面图像作为输入数据；将污染物分布视为不透明掩膜，这样一来，光纤端面图像上的每个像素都有可能通过（无碎屑，功率通过率为100%）或被遮挡（存在碎屑，功率通过率为0%）。将该掩膜与通过光纤的功率分布进行叠加，即可估算出传输功率，进而估算出插入损耗。当然，由于连接涉及两个端面，因此必须将两端分布的污染物的遮挡效果结合起来进行计算。

如以下来自参考文献1的图2所示，上述模型能够在一定程度上解释插入损耗性能，其中在最终测得的损耗和通过此过程估算出来的损耗之间存在显著的相关性。但是，最右的多项式预测法与理想状态还相差甚远，远远未达到实施低误报率或低漏报率的通过/失败标准所需的条件。此外，损耗的大小与高斯加权遮挡面积也不一致，例如，如果30%的功率被吸收或阻挡，则预期损耗应为1.5 dB，而不是最优预测法所示的0.6 dB。

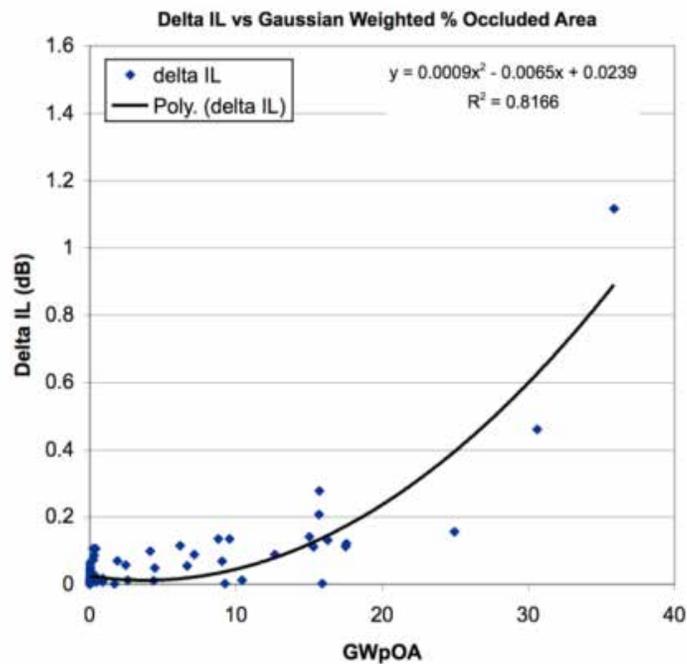


图2：来自参考文献[1]。由碎屑引起的额外插入损耗是高斯加权遮挡面积百分比（GWpOA）的函数。数据点（“delta插入损耗”）拟合到二次趋势线。

这种模型非常简单易行，但是由于未能将许多因素考虑在内，因此预测结果可能与实际结果有所出入。要准确计算两个连接器之间对接区域内污染物带来的光学损耗，需要对污染物的3D分布情况进行分析，而这取决于建立连接后目标波长下污染物的光学特性。以下有关污染物分布的大部分信息无法通过常用检测镜获得：

- 常用检测镜通常使用蓝光照明，这样固然可以有效地提供良好的空间分辨图像，但无法显示近红外光波长下的光学特性。
- 许多常用检测镜内的光学器件都旨在生成具有强烈对比度的图像，例如，仅拾取直接通过端面或散射角度极小的光，而大多数碎屑颗粒看起来较暗。这些检测镜确实能够呈现具有良好对比度的碎屑，但即使在蓝光波长下，也无法获得关于折射率的实部和虚部的信息。
- 通过这些检测镜获得的图像无法提供有关碎屑形状、材料成分和机械性能的信息。物理接触性连接需要承受较大压力（LC连接器需要承受约1000个大气压的压力），从而引起所需的赫兹接触变形，因此在连接状态下，大多数污染物将处于完全变形状态。其中，在接口处形成间隙的较小碎屑颗粒会承受更大的压力。存在污染物的接口的光学性能将由这种已变形的材料的分布情况来决定。要了解这种分布情况，就需要了解未连接状态下的初始分布情况以及外部压力对该分布的影响模型。
- 与多模光纤相比，遮挡面积模型更加不适用于单模光纤，因为在决定透射情况过程中起到主要作用的是相位。举一个极端的例子，在由 $\pi$ 弧度决定的基本模式中，一半的相移就能完全阻挡透射，完全不需要通过材料来吸收光能，在这种情况下，光将完全被耦合到包层区中。

图3显示了通过台式连接器检测镜在LC端面上观察到的皮屑外观。皮屑完全呈黑色，为不透明物质。尽管通常情况下，皮屑的不规则边缘会导致光线偏转，但蓝光却能很好地穿透皮屑。请注意，根据遮挡面积模型得出的预测结果，能完全遮挡光纤的皮屑所导致的损耗为100%，即插入损耗的dB值为无穷大。

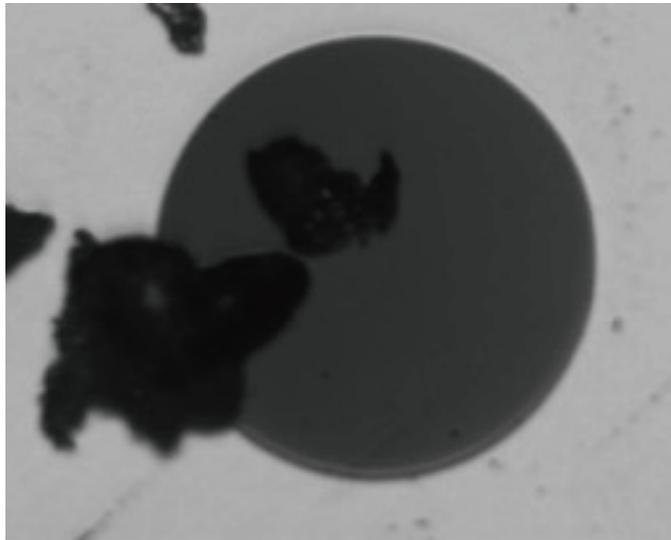


图3：通过连接器检测镜所观察到的光纤和周围氧化锆插芯上的皮屑。请注意，半透明的皮屑看起来完全呈黑色。

图4清晰地显示了在物理连接中，光学接口所承受的巨大压力。白色圆盘实际上是在连接建立时被压碎的球形钢粉颗粒。在这种情况下，球形钢粉颗粒的强度足以损坏光纤内部的玻璃成分。此外，还需考虑这种压力对像皮屑这样较为柔软的物质可能产生的影响。

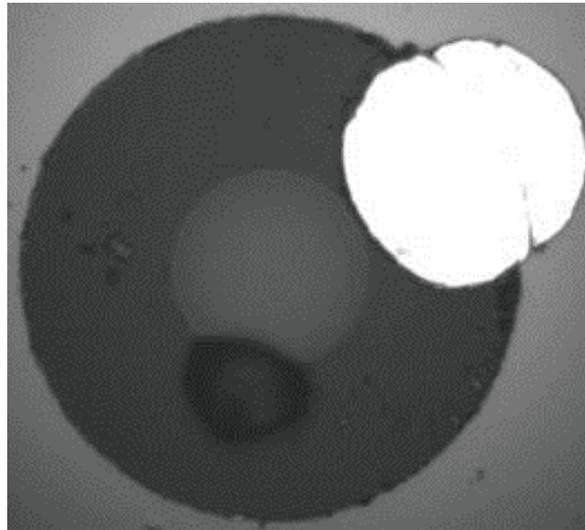


图4：带有钢片（白色区域）的单芯光纤连接器端面图像，该钢片最初为球形钢粉颗粒，由连接器对接产生的压力压碎而成。

为了通过实验了解真实的插入损耗，我们研发了一种可在单芯光纤连接器中的光纤上放置颗粒的技术。这些颗粒被散布在一块薄玻璃板上，在玻璃板的一侧通过显微镜引导另一侧的连接器与其中一个颗粒接触并使之附着在连接器上。在除去玻璃板后，使用同一显微镜对连接器上的颗粒进行成像。

图5显示了在与洁净的连接器对接后，被污染连接器端面上3种不同成分的颗粒的外观。

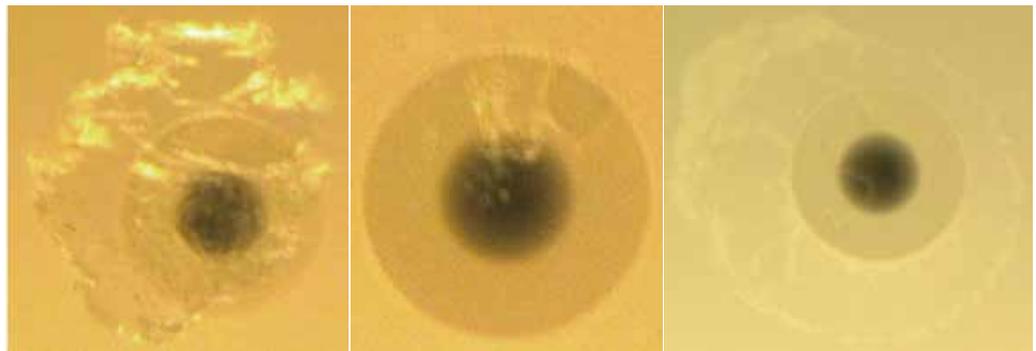


图5：将颗粒放置在LC连接器中的光纤上，研究遮挡对插入损耗的影响，这些颗粒包括：（a）均聚甲醛（Delrin®）；（b）聚醚酰亚胺（Ultem®）；（c）皮屑。

表3列出了针对各种物质测得的插入损耗。请注意，由于这些图像是使用具有较大数值孔径的普通实验室显微镜拍摄，因此外观有较大区别（并且由于使用了白光照明，因此可以生成彩色图像）。损耗值范围较广，而且似乎与图5所示的覆盖度并无显著的相关性。特别需要指出的是，覆盖整个核心区的皮屑在对接时仅导致极低的损耗，这与根据检测镜下观察到的外观所预期的100%损耗相差甚远（图3）。

这样的实验结果并不意味着碎屑不会加剧插入损耗；相反，为了准确估算由此产生的影响，除了简单的检测图像之外，我们还需要获得更多的数据。

物质	插入损耗
连接1: 均聚甲醛	0.08 dB
连接2: 聚醚酰亚胺	0.48 dB
连接3: 皮屑	0.01 dB

表3: 图5所示被污染物遮挡的连接器的插入损耗的测量值。

### 连接器端面污染物成像与测定

为了切实了解污染物和清洁程度的影响，我们必须研发出一套行之有效的办法，来评估插芯端面上的污染物总量。当前业内的成像系统和图像分析软件旨在根据用户定义的标准，基于端面外观判定通过/遮挡能力。业界通常采用IEC 61300-3-35标准为依据；但是，这些标准虽然适用于端面损耗检测，但却不适用于污染物检测。实际上，根据IEC相关文件要求，在对光纤连接器进行检测之前，首先需要清除端面上所有的松散碎屑（“松散碎屑”意指“可以通过清洁流程去除的微粒和碎屑”）；从我们的角度来看，这是一个循环的过程（我们注意到，IEC标准正处在评审阶段，而这可能会影响本章节的部分论述和结论）。在此标准的影响下，检测软件包主要聚焦IEC界定的检测区域，即位于单芯光纤连接器的纤芯上直径为250 μm的圆环内，而对于MPO型光纤连接器而言，仅聚焦光纤本身。当这个区域的污染水平超过IEC界定的阈值而无法通过检测时，一些常规检测流程甚至会随之停止。由此，虽然利用清洁棒清洁过的端面能够通过IEC检测，但除核心清洁区域之外，其他区域仍然存在着大量污染物，如图6所示。对于我们的工作而言，我们需要能够检测整个端面并识别端面上所有碎屑和其他污染物的软件，并且，这种软件要能够准确呈现清洁流程的效果，并显示要移除或添加的功能。对于MPO型插芯而言，这尤其具有挑战性。

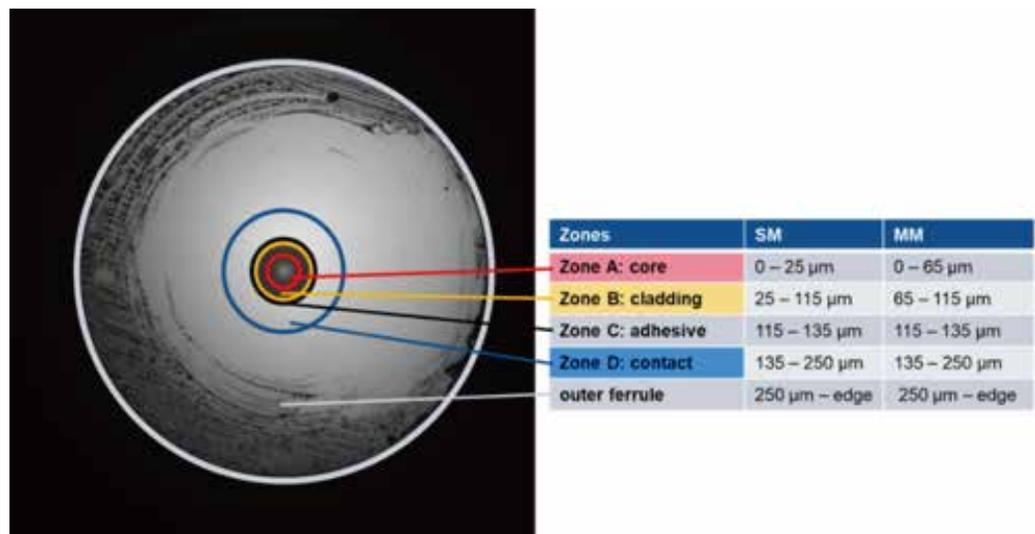


图6: 针对多模LC连接器的IEC检查区域（故意让端面沾染油性物质，然后使用带粘胶的清洁棒进行清洁）。

就检测设备所应具备的资质而言，当前的IEC标准给出的定义较为宽松。我们发现，可靠的碎屑检测取决于多种因素，但标准中并未对这些因素进行定义：

- 光学系统的有效分辨率——主要受光学器件和工作波长的影响，此外还受到成像芯片像素大小和动态范围的影响。
- 对焦精度（可能是自动对焦），特别是对焦重复性。这会影响分辨率，进而影响图像的对比度。
- 照明系统——波长、亮度、稳定性和角度分布。
- 设备的机械稳定性——图像振动会降低碎屑颗粒的对比度，增加可视区域面积，甚至可能导致无法看到颗粒。

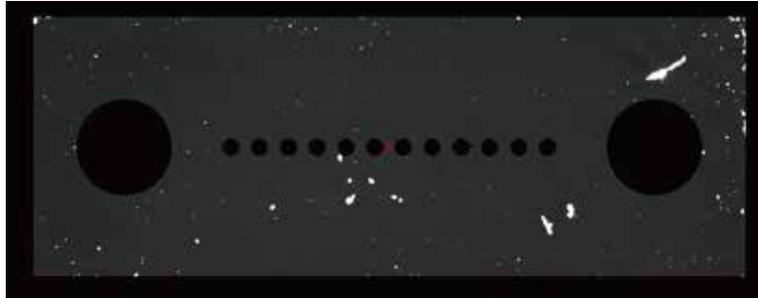


图7：进行成像和图像分析之后所显示的MPO端面；白色区域为被识别出的碎屑颗粒。

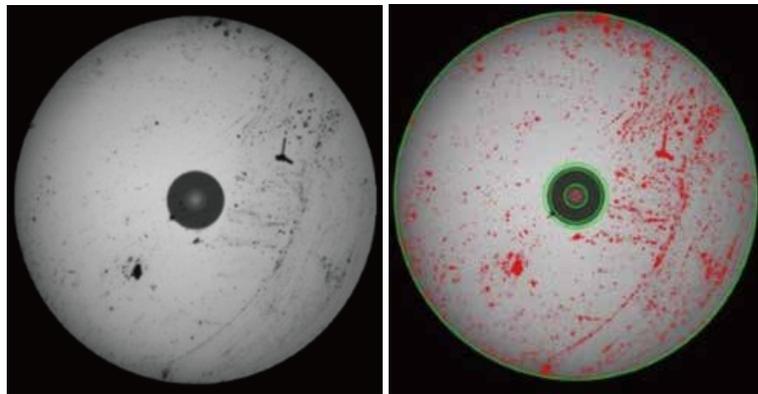


图8：LC连接器端面图像，原始图（a）和分析图（b）-被识别出来的碎屑标为红色。

### 污染物的来源和机制

表2和表3中列出了在连接器上发现的多种污染物成分，其类型之广泛并不足为奇，因为连接器是在正常的工业生产环境下生产出来，而且生产条件各不相同。连接器在生产过程中会经过多个加工和处理环节，包括将端面抛光、加盖和开盖，之后再插入紧密贴合的金属夹具中进行检测和测量等。此外，连接器还会暴露于遍布光缆材料和外壳零件的加工及组装环境中。

除了生产环境之外，检测和安装环境中由于需要打开连接器，可能也会带来新的污染物。

#### 抛光：

在抛光过程中，无论是在湿抛光膜上进行抛光还是使用研磨浆液进行抛光，都会产生液体残留物，其中包括从光纤和插芯中磨掉的颗粒以及研磨剂。这些残留物干燥之后，就会形成一层难以清除的顽固污渍。若在端面上发现粘合牢固的条纹或污点，即表明存在此类抛光残留物。在连接器外壳或光缆护套的某些部位上，抛光残留物干燥之后会产生微粒，进而成为另外一种污染源。

#### 空气中的灰尘沉积到裸露的端面上：

这是一个非常缓慢的过程，灰尘通常会松散地附着在端面上，很容易清除。图9显示了一些最初曾被清洁过的连接器端面，这些端面垂直朝上安装，并在达不到洁净室标准的典型环境下暴露于空气中约1周时间。显然，灰尘沉积的速度非常慢，以下事实可以说明这一点：在检查过程中，很少能观察到颗粒到达端面的情况，但也不是非常罕见。灰尘的沉积速度和粘附力可能都取决于端面的静电荷状态。我们在端面上测量到了较高的电压（在某些情况下，电压约达500V），而在其他表面（例如零件袋）上甚至更高。静电荷的水平可能受到湿度、操作和加盖/开盖过程中的摩擦力的影响。

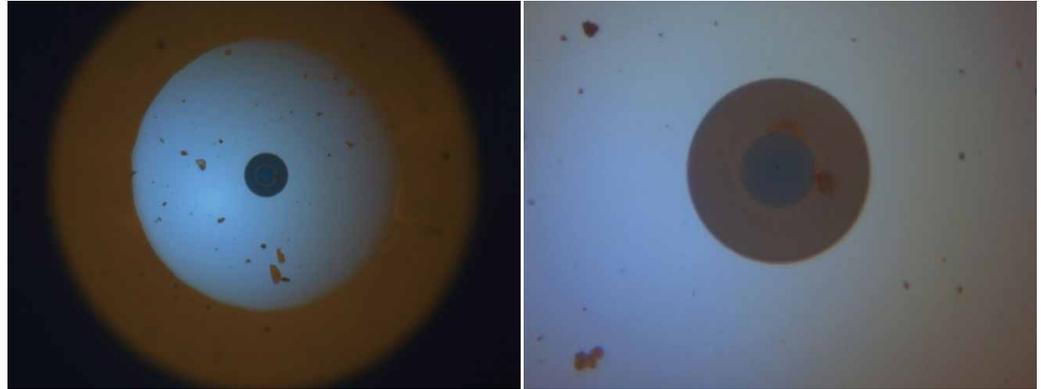


图9：最初经过清洁的LC连接器（端面朝上）在环境空气中暴露大约一周之后的检测结果。左图：整个端面的完整视图；右图：放大后的光纤区域。

#### 检验夹具带来的交叉污染：

在生产和安装过程中都会使用检测镜对连接器端面进行检测，以评估其是否符合无划痕、无凹陷、无污染物等要求。在检测镜内，连接器插芯会被机械夹具牢牢固定，以便快速、轻松地对准仪器的光轴。这些夹具可能会粘带端面上的碎屑，并将这些碎屑转移到别的连接器上，同时也有可能因为机械磨损而产生更多碎屑。碎屑的转移可以通过机械接触或通过静电力作用而发生。在上图4中看到的被压碎的球形钢粉颗粒正是这种转移导致的结果，球形钢粉颗粒源自人为操作带来的“污物”，这些污物原本存在于此前曾使用过同一夹具进行检测的另一个连接器（请注意，该夹具在对受污染的连接器进行检测之后，已经被清洁过，并且已被移动至其他实验室，但在采集图4中的图像之前还未被清洁过，也未被移动过）。图10和图11展示的是使用钻空商用检测镜夹具拍摄的视频的静态图像，从中可以看到在静电场的影响下，污染物微粒跳动的情形。

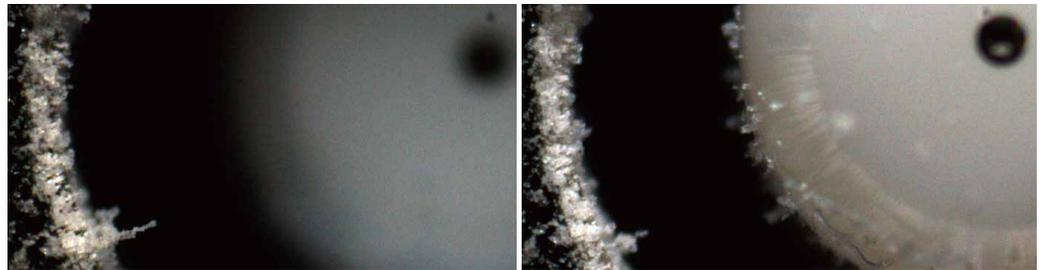


图10：当LC插芯接近钻空金属夹具时，夹具上的灰尘颗粒（左）通过静电力被吸附到夹具（右）上。插芯和夹具上都存在大量有意放置的污染物，以便呈现静电力作用的效果。

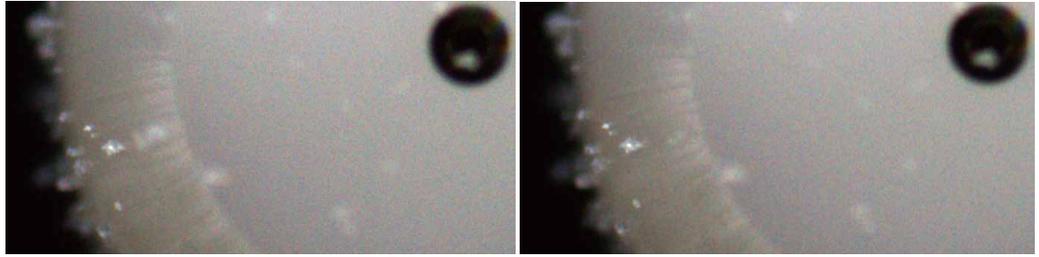


图11: 在采集图10中的图像后不久, 插芯(左)上的灰尘颗粒从其上跳落, 据推测, 这是受到了静电力的影响。

#### 处理:

在某些生产或安装环境中, 操作员不一定会佩戴手套或指套, 因此连接器端面可能会留下指纹或其他身体部位皮肤的印迹。出人意料的是, 因人体部位接触而形成的污染物一般很难去除, 需要使用固体擦拭器擦除。跟人体不同部位接触所带来的污染物在清洁难度上各不相同, 例如鼻部油脂较为油腻, 很容易清除; 而源自手臂后端的污染物则难以去除, 需要使用固体擦拭器; 而指纹的清洁难度则似乎介于两者之间。但是请注意, 即使操作员佩戴手套也很难避免交叉污染。

#### 源自防尘帽的污染物:

防尘帽可能会携带注塑成型过程中产生的微粒碎屑。这些微粒碎屑可能从空气中、接触面或因碰触到其他防尘帽而沾染, 同时在碰触到较为粗糙的外部表面(包括插芯端面)或其他防尘帽时也会产生更多碎屑。这类污染物可以经由已知的载体转移到端面, 包括: 机械接触、机械冲击(例如, 将防尘帽推到连接器上时发生的粘滑运动)、静电力, 甚至可能是气流。

我们已经注意到, 单芯光纤连接器端面上的碎屑(那些带有斜面氧化锆插芯的碎屑)往往位于中心抛光面和较粗糙的斜面外部区域之间的界限上。这意味着在该界限处, 当防尘帽触碰到夹具时, 罩材或夹具都会发生机械磨损, 而且针对抛光中心区域的清洁更为有效。

在连接器生产过程中, 用来保护其端面的防尘帽通常由PVC制成, PVC质地柔软而富有弹性, 但包含油性化合物(通常是邻苯二甲酸盐), 这也是PVC富有弹性的原因。这些化合物有时会在连接器上留下油滴, 因此在连接器对接时, 会在接触区域周围形成油滴环。

鉴于生产连接器所使用的材质较多, 而且很多环节都有可能带来污染物, 如固有的去污工艺(例如抛光)等, 即使在严格控制的清洁环境中组装连接器, 如果没有最后的清洁步骤, 也可能无法提供合格的最终产品。

即使连接器在组装完毕并加盖之后, 在最终进入客户安装场地并进行对接之前, 仍有可能沾染污染物。

虽然在原则上, 我们尚未加以证明, 但在气压、温度、湿度等条件发生变化和/或存在振动的环境中存放, 连接器端面上可能会出现颗粒或脱气膜等污染物。

如同在装配过程中一样, 连接器在安装环境中暴露于空气之下以及跟检验夹具接触时都会产生污染物, 并且当连接器从检测镜夹具中移出, 再次暴露在空气中, 并最终被插入适配器进行对接的环节中, 任何检测方式都无法避免最后的一个盲区。

基于这些研究，我们绘制了一些路线，用以表明来源于连接器外壳或环境中碎屑富集点的颗粒是如何出现在连接器端面上的。图12展示了其中一条路线。

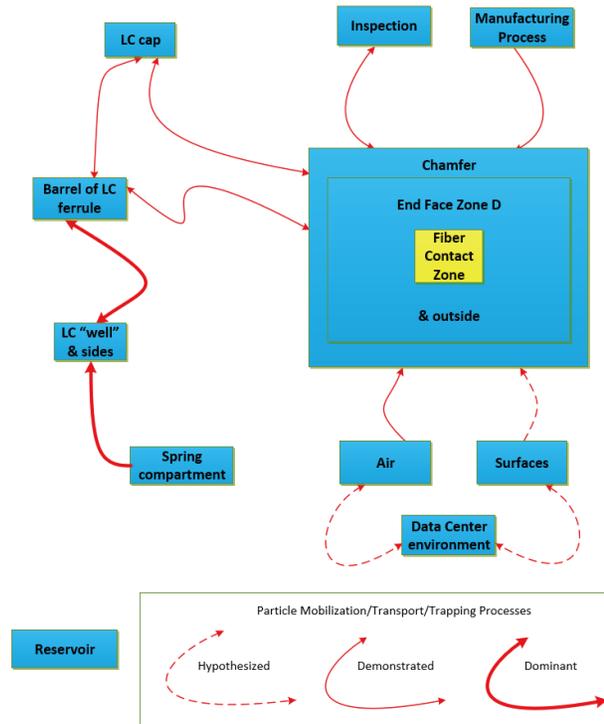


图12: LC连接器碎屑富集点和碎屑转移路径

### 颗粒迁移

颗粒从外部迁移到连接器表面的现象被称为污染事件，这已在之前的章节中展开了论述。然而，在连接器端面的表面区域内也可能发生颗粒迁移现象。在这种情况下，碎屑不会增加，但是原本位于插芯边缘且不会干扰光传导的颗粒可能会进入光纤的核心区域或包层区域，从而导致插入损耗或回波损耗问题。

图13呈现的是被有意污染过并使用带粘胶的清洁棒清洁过的连接器端面。该连接器通过了基于IEC标准的检测，因为污染物存在于检查区域（图6所示的D区）以外的地方。如果污染物只是松散地附着在端面上，即使不直接发生物理接触，在操作或加盖过程中它们也有可能从端面的边缘移动到光纤区域。我们已经观察到，在重复的加盖/开盖过程中，污染物会出现因静电力或空气运动而发生迁移的情况。

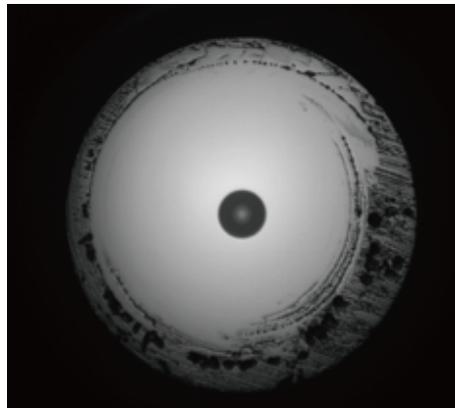


图13: 被油性物质污染并被带粘胶的清洁棒清洁过的端面。

在连接过程中，端面也可能会沾染另一个连接器端面上的碎屑。图14展示了洁净的MPO连接器与脏污的连接器对接时（可能是通过机械接触）污染物的迁移情况。

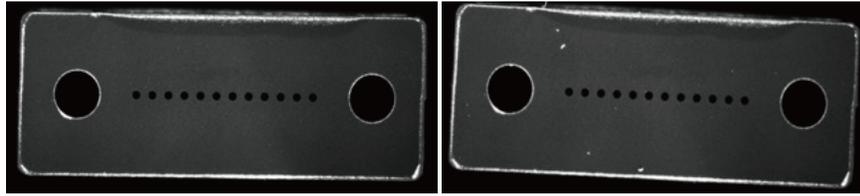


图14：洁净的连接器（a）与脏污的连接器对接后（b），污染物明显地从后者迁移到前者。

因此，在最终检验环节过后，一定要对整个端面进行清洁，防止碎屑转移至端面的关键区域。即使未在安装现场进行清洁的情况下，这样的举措也将有助于为数据中心连接提供良好的插入损耗性能（图1）。

### 防尘帽设计的影响

我们发现，有必要对防尘帽的设计进行优化，以便更好地应对污染和碎屑迁移风险。从图15所示的标准防尘帽剖面图可以看出，目前的设计存在引入污染物的风险。

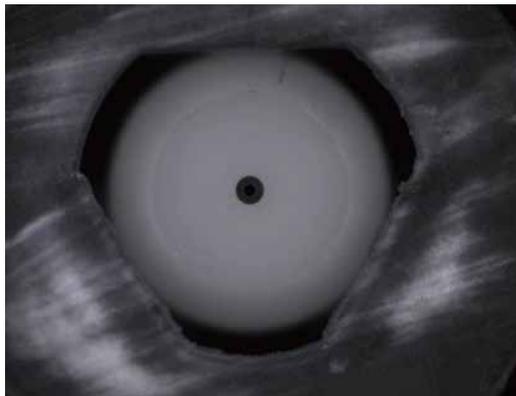


图15：标准防尘帽剖面图表明其很有可能会引入污染。

在此过程中，我们尝试了多种标准的和经过优化的防尘帽设计方案，并测量了每种设计方案在加盖/开盖后对端面污染的影响，在某些情况下，连接器在未开盖或接受检验之前就已经发货。如图16所示，我们发现只有标准防尘帽会增加连接器端面的污染。

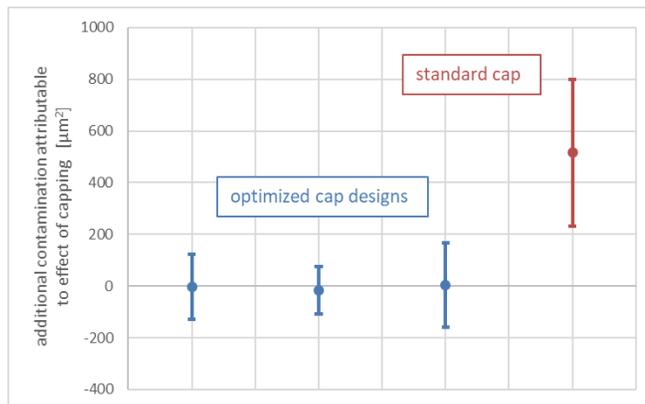


图16：针对四种不同的防尘帽设计方案（包括三种优化设计方案和一种标准设计方案），在洁净LC连接器加盖和开盖之后，利用最终污染面积减去最初污染面积得出的结果。

此外，我们还尝试了包括抗静电材料在内的多种材质。我们原本预期防静电材料会取得更加良好的表现，但事实上防静电材料没有表现出任何优势。有迹象表明，就加盖之后再开盖所引起的洁净度变化而言，防静电材料的表现可能要优于其他材质，但相关的统计数据仍较少，需要对此开展进一步研究。在使用这些防静电材料之前，需要谨慎考虑，因为其中含有的助剂可能会造成污染。

## 结语

本文回顾了针对数据中心光纤连接器端面碎屑和其它污染物开展的一些研究工作。我们发现，基于高对比度污染区域图像来评估污染物对光学损耗的影响并不可行，而且由于无法获得建立光学损耗模型所需的大部分信息，这种方法也存在着很大的不确定性。我们对污染物性质的研究表明，污染物的化学成分和材料种类异常繁杂。此外，我们还探讨了这些污染物的来源以及它们向连接器光学端面迁移的众多途径。

基于IEC针对光纤连接器端面检测和端面质量提出的要求，我们探讨了通过图像分析可靠地测量污染程度所面临的挑战，尤其是在不使用检测仪器的情况下。此外，我们还指出，在检测过程中使用接触式夹具有可能会造成交叉污染，因为使用这类装置检验脏污的连接器之后，会将污染物扩散至随后接受检验的洁净连接器并最终造成污染。

我们还探讨了防尘帽设计的影响，其中包括经优化防尘帽所具备的优势，以及标准防尘帽可能会引入污染。

最后，我们探讨了下述举措的可能性：在工厂采用增强型清洁流程对连接器的整个端面进行彻底清洁，即使在安装现场取消清洁环节的情况下，连接器仍可保持良好的光学性能。

## 参考文献

T. Berdinskikh、A. Ho、J. Garcia、C. Gleason、S. Huang、J. Kilmer、S. Lytle、T. Mitcheltree、B. J. Roche、H. Tkalec、D. H. Wilson和F. (Y.) Zhang，《针对带有1.25和2.5 mm插芯的单模连接器清洁度规范的制定》，光纤通信大会暨展览会及美国光纤工程师大会，《技术文摘（Technical Digest）》（美国光学学会，2006年），JThB85号论文。



CORNING

康宁光通信中国·上海市漕河泾高科技开发区桂南路111号立明大厦3楼 (200233)  
电话：+86 21 5450 4888·传真：+86 21 5427 7898·www.corning.com/opcomm

康宁光通信保有改进、提高和修改康宁光通信产品的功能和规格的权利，恕不另行通知。康宁光通信的完整商标列表可在www.corning.com/opcomm/trademarks上获得。其他所有商标均为其各自所有者所有。康宁光通信通过了ISO9001认证。

©2020 康宁光通信版权所有 LAN-2779-ZH 2020年6月